Christian Ngô
Hélène Ngô

Physique des semi-conducteurs

Cours et exercices corrigés

4e édition

DUNOD

Illustration de couverture : © DJM-Photo – Fotolia.com

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.
Le Code de la propriété intellectuelle du 1er juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.
Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

DANGER
LE PHOTOCOPILLAGE TUE LE LIVRE

© Dunod, Paris, 1998, 2003, 2007, 2012
ISBN 978-2-10-058343-0

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).
Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Table des matières

AVANT-PROPOS xi

RAPPELS UTILES xiv

CHAPITRE 1 • **PHYSIQUE QUANTIQUE** 1

1.1 Dualité onde-corpuscule 2

1.2 Relation de de Broglie 3

1.3 Postulats 4

1.4 États stationnaires 6

1.5 Mesures simultanées d'observables 6

1.6 Relations d'incertitude 7

1.7 Nombres quantiques 8

1.8 Spin 8

1.9 Bosons et fermions 9

1.10 Quantique ou classique ? 9

1.11 États liés et états du continu 10

Exercices 15

Corrigés 16

CHAPITRE 2 • **PHYSIQUE STATISTIQUE** 17

2.1 Postulats 17

2.2 Entropie statistique 18

2.3 Travail, chaleur 20

2.4 Conditions d'équilibre 21

2.5 Ensembles 24

2.6 Théorème d'équipartition de l'énergie 27

2.7 Statistiques quantiques 27

2.8 Gaz parfait de Fermi 29

Exercices 33

Corrigés 34

© Dunod – Toute reproduction non autorisée est un délit

CHAPITRE 3 • **STRUCTURE CRISTALLINE** 39
3.1 Le cristal idéal 39
3.2 Réseaux cristallins 40
3.3 Diffraction par un réseau cristallin 49
3.4 Défauts cristallins 54
Exercices 56
Corrigés 57

CHAPITRE 4 • **BANDES D'ÉNERGIE** 59
4.1 Approximations 59
4.2 Méthode des liaisons fortes 62
4.3 Symétries 65
4.4 Approche des liaisons faibles 67
4.5 Propriétés statiques des électrons 71
4.6 Schéma réduit de Brillouin 72
4.7 L'équation centrale 74
4.8 Surface de Fermi 75
4.9 Métaux, isolants, semi-conducteurs 76
4.10 De l'isolant au métal 79
Exercices 81
Corrigés 82

CHAPITRE 5 • **DYNAMIQUE DU RÉSEAU** 83
5.1 Vibrations du réseau 83
5.2 Phonons 87
5.3 Propriétés thermiques 88
Exercices 92
Corrigés 93

CHAPITRE 6 • **SEMI-CONDUCTEURS À L'ÉQUILIBRE** 95
6.1 Notion de trou 95
6.2 Gap 96
6.3 Masse effective 98
6.4 Structure des bandes d'énergie 102
6.5 Densité d'états 104
6.6 Densité d'électrons et de trous 105

6.7 Semi-conducteurs intrinsèques 107
6.8 Dopage 108
6.9 Semi-conducteurs extrinsèques 114
Exercices 116
Corrigés 117

CHAPITRE 7 • **DYNAMIQUE DES ÉLECTRONS** 119
7.1 Dérive dans un champ électrique 120
7.2 Réponse à un champ électrique 123
7.3 Diffusion des porteurs 126
7.4 Potentiel externe et bandes d'énergie 129
7.5 L'effet Hall 129
Exercices 131
Corrigés 133

CHAPITRE 8 • **DISPOSITIFS ÉLÉMENTAIRES (I)** 137
8.1 La jonction pn 137
8.2 Perturbations dues à la surface 144
8.3 La jonction métal–métal 147
8.4 La jonction métal–semi-conducteur 148
Exercices 151
Corrigés 153

CHAPITRE 9 • **DISPOSITIFS ÉLÉMENTAIRES (II)** 157
9.1 Le transistor bipolaire 157
9.2 La diode tunnel 161
9.3 Transistors à effet de champ 162
9.4 Structures MIS et MOS 166
9.5 Le transistor MOS 168
9.6 Hétérojonctions 172
Exercices 174
Corrigés 175

CHAPITRE 10 • **PROPRIÉTÉS OPTIQUES** 177
10.1 Absorption de photons 177
10.2 Émission spontanée de photons 185
10.3 Émission stimulée 187

© Dunod – Toute reproduction non autorisée est un délit

Exercices 190
Corrigés 191

CHAPITRE 11 • **VERS L'ÉCHELLE NANOMÉTRIQUE** 193
11.1 Systèmes mésoscopiques 194
11.2 Puits, fils et boîtes quantiques 195
11.3 Densité de niveaux 196
11.4 Puits quantiques 197
11.5 Multipuits quantiques et superréseaux 199
11.6 Transmission résonante sous la barrière 200
11.7 Le blocage de Coulomb 201
11.8 Dispositifs à un électron 204
11.9 Effet Hall quantique 204
11.10 Spintronique 206
11.11 L'électronique moléculaire 208
11.12 La technologie 208
11.13 Conclusion 209
Exercices 210
Corrigés 210

CHAPITRE 12 • **DU NANOMONDE AUX APPLICATIONS** 211
12.1 La nano-électronique : pourquoi ? 212
12.2 Voir et manipuler l'infiniment petit 215
12.3 Nouvelles formes de carbone 217
12.4 À l'échelle du nanomètre, le monde change 219
12.5 Top-down ou bottom-up ? 221
12.6 La nanomédecine 225
12.7 Nanoparticules et santé 228
12.8 Nano-électronique et libertés individuelles 229
Exercices 230
Corrigés 230

BIBLIOGRAPHIE 233

INDEX 235

Avant-propos

Les dispositifs électroniques à semi-conducteurs ont maintenant une importance économique et stratégique considérable pour le traitement de l'information et de la communication. Ils ont un rôle clef dans la réalisation et le fonctionnement de beaucoup de biens de consommation. Leur importance est née avec la découverte, en 1948, du transistor. Le développement de l'industrie électronique s'est par la suite accéléré avec, dans les années 1970, l'arrivée des circuits intégrés. Le silicium occupe la position dominante parmi les semi-conducteurs et cette situation devrait encore durer longtemps.

Les circuits intégrés concentrent, sur une faible surface, un nombre de plus en plus grand de transistors et leur puissance augmente sans cesse. Ils répondent à une demande du consommateur qui souhaite avoir de plus en plus de confort dans la vie courante en se débarassant des tâches fastidieuses. Pour cela il faut des dispositifs de traitement de l'information de plus en plus puissants. Une simple carte de crédit contient environ 2 millions de transistors et une automobile actuelle embarque plus d'électronique que les premiers avions Airbus. Les circuits intégrés peuvent être fabriqués simultanément en grand nombre si bien que leur coût de production diminue considérablement alors que leurs performances augmentent. L'industrie microélectronique est gouvernée par la nécessité de réaliser des composants électroniques (mémoires ou circuits intégrés) toujours plus rapides, plus petits et moins chers.

L'électronique a beaucoup évolué depuis la réalisation du premier transistor. En vingt-cinq ans les performances des microprocesseurs ont été multipliées par 25 000. Sur une surface inférieure à celle du premier transistor, on peut maintenant en mettre plus d'un million. Le prix d'un million de transistors était d'environ 75 000 € en 1973, soit le prix d'une maison. Il est descendu à 6 centimes d'euros en 2000 puis, en 2005, à seulement 0,5 centime d'euro. Alors que le premier microprocesseur d'INTEL, le 4004, contenait 2 300 transistors, le Pentium IV des années 2001 en contenait 55 millions, les premiers centrinos d'INTEL plus de 77 millions et le core duo plus de 150 millions sur une surface de moins de 100 mm^2. Entre 1964 et la fin des années 1970 le nombre de transistors d'un circuit intégré doublait tous les ans. Depuis cette date, il ne double plus que tous les 18 mois ce qui reste une performance impressionnante. Cette observation,

© Dunod – Toute reproduction non autorisée est un délit

connue sous le nom de loi de Moore, montre l'extraordinaire vitalité de l'électronique des semi-conducteurs.

L'intégration croissante des composants est en grande partie due à la possibilité de graver des motifs de plus en plus fins dans le silicium. La célèbre série de microprocesseurs 8086 (environ 29 000 transistors), développée par la société INTEL pour les premiers micro-ordinateurs PC, était réalisée avec une technologie dans laquelle on gravait le silicium avec une précision de 4 μm. En 1982, le microprocesseur 80286 était fabriqué avec des règles de dessin de 2 μm. Il fut suivi par les i386DX et i486Dx fabriqués, respectivement, avec une technologie de 1,2 μm et 1 μm. Le Pentium IV basse consommation des années 2000 utilisait une précision de gravure de 0,13 μm. On est aujourd'hui descendu à des finesses de gravure de 65 nm. Les mémoires ont également connu une évolution impressionnante. La première mémoire DRAM (1970) ne faisait que 1 ko mais on atteignait une capacité de 4 ko en 1979. En 2001, on réalisait industriellement des DRAM de 512 ko. On en trouve maintenant qui ont des capacités de plusieurs dizaines de Go et l'on dépasse les 100 Go.

L'objectif de cet ouvrage est de présenter la physique des semi-conducteurs à des physiciens et des chimistes dont le niveau est celui d'un premier cycle universitaire ou équivalent. Il s'agit d'un cours d'initiation pour tous ceux qui veulent acquérir rapidement des bases élémentaires dans ce domaine. Il pourra être complété par la lecture d'ouvrages plus complets dont certains sont cités dans la bibliographie.

Les composants de l'électronique moderne sont, pour la grande majorité d'entre-eux, réalisés à partir de semi-conducteurs cristallins. Leur fonctionnement est basé sur des phénomènes de la physique quantique et statistique. Ces sujets sont rappelés dans les deux premiers chapitres. Le troisième introduit la physique des cristaux, le chapitre 4 montre que l'arrangement périodique des atomes dans un cristal conduit à des bandes d'énergie qui gouvernent ses propriétés électriques et le chapitre 5 étudie les vibrations des atomes du cristal. Les propriétés électriques des semi-conducteurs sont gouvernées par celles des électrons les moins liés de l'édifice cristallin. Leurs propriétés statiques et dynamiques sont respectivement étudiées dans les chapitres 6 et 7. Les chapitres 8 et 9 abordent, de manière qualitative, la physique des composants électroniques élémentaires. Le chapitre 10 est consacré à l'interaction des électrons et des photons qui est à la base des composants optroniques. Le chapitre 11 introduit le domaine des systèmes de dimensions nanométriques qui préparent l'électronique du futur. En effet, l'évolution de l'industrie micro-électronique rencontre des défis technologiques et physiques nouveaux lorsque l'on descend à des dimensions inférieures à quelques dizaines de nanomètres. Elle devra les résoudre pour continuer à se développer mais elle pourrait aussi être ralentie avant pour des raisons économiques si les investissements deviennent trop grands pour être rentabilisés. Le dernier chapitre aborde le problème des nanotechnologies, des nanosystèmes et de la nano-électronique en essayant de réfléchir sur les applications futures, sur les enjeux ainsi que sur les

impacts que peuvent avoir ces technologies sur la société. À la fin de chacun des chapitres, des exercices corrigés sont proposés.

L'un d'entre-nous (C.N.) souhaite remercier le Laboratoire d'Electronique de Technologie et d'Instrumentation (LETI) du Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) pour lui avoir fait découvrir le domaine passionnant de l'électronique moderne et de ses technologies. Il a bénéficié, au cours de quelques années passées au LETI, d'enrichissantes discussions avec de nombreux collègues qui sont vivement remerciés ici.

• **Notations :** les vecteurs sont notés à l'aide de caractères gras. Par exemple, **A** est un vecteur de composantes (A_x, A_y et A_z). Toutefois, pour ne pas confondre le vecteur champ électrique et l'énergie, nous noterons ce vecteur avec une flèche ($\overrightarrow{\mathsf{E}}$).

Rappels utiles

Constantes physiques

Charge de l'électron	$-e = -1{,}602\,19 \times 10^{-19}\,\mathrm{C}$
Constante de Boltzmann	$\mathsf{k}_\mathrm{B} = 1{,}380\,664 \times 10^{-23}\,\mathrm{J/K}$
Constante de Planck	$\begin{cases} h = 6{,}626\,18 \times 10^{-34}\,\mathrm{Js} \\ \hbar = h/2\pi = 1{,}054\,590 \times 10^{-34}\,\mathrm{Js} \end{cases}$
Constante de structure fine	$\alpha = e^2/(4\pi\epsilon_0\hbar c) = 1/137{,}0360$
Constante de Rydberg	$R_\infty = 1{,}097\,373\,20 \times 10^7 \mathrm{m}^{-1}$
Constante des gaz parfaits	$R = \mathcal{N}\mathsf{k}_\mathrm{B} = 8{,}314\,41\ \mathrm{JK}^{-1}\mathrm{mol}^{-1}$
Masse de l'électron	$m = 9{,}109\,54 \times 10^{-31}\ \mathrm{kg}$
Masse du neutron	$m_n = 1{,}674\,95 \times 10^{-27}\ \mathrm{kg}$
Masse du proton	$m_p = 1{,}672\,65 \times 10^{-27}\ \mathrm{kg}$
Nombre d'Avogadro	$\mathcal{N} = 6{,}022\,05 \times 10^{23}$
Perméabilité du vide	$\mu_0 = 1/\epsilon_0 c^2 = 4\pi 10^{-7}\ \mathrm{Hm}^{-1}$
Permittivité du vide	$\begin{cases} \epsilon_0 = 8{,}854 \times 10^{-12}\ \mathrm{Fm} \\ 1/(4\pi\epsilon_0) = 8{,}988 \times 10^9\ \mathrm{Nm^2C^{-2}} \end{cases}$
Rayon de Bohr	$a_1 = 4\pi\epsilon_0\hbar^2/(me^2) = 52{,}9177\ \mathrm{pm}$
Vitesse de la lumière dans le vide	$c = 2{,}997\,924\,58 \times 10^8\ \mathrm{m/s}$

Préfixes

deca	$\longrightarrow$	10^1	symbole	da	deci	$\longrightarrow$	10^{-1}	symbole	d
hecto	$\longrightarrow$	10^2	symbole	h	centi	$\longrightarrow$	10^{-2}	symbole	c
kilo	$\longrightarrow$	10^3	symbole	k	milli	$\longrightarrow$	10^{-3}	symbole	m
mega	$\longrightarrow$	10^6	symbole	M	micro	$\longrightarrow$	10^{-6}	symbole	μ
giga	$\longrightarrow$	10^9	symbole	G	nano	$\longrightarrow$	10^{-9}	symbole	n
tera	$\longrightarrow$	10^{12}	symbole	T	pico	$\longrightarrow$	10^{-12}	symbole	p
pecta	$\longrightarrow$	10^{15}	symbole	P	femto	$\longrightarrow$	10^{-15}	symbole	f
exa	$\longrightarrow$	10^{18}	symbole	E	atto	$\longrightarrow$	10^{-18}	symbole	a

Unités particulières

$1\,\text{Å} = 10^{-10}\,\mathrm{m}$ $\qquad$ $1\,\text{fermi} = 1\,\text{fm} = 10^{-15}\,\mathrm{m}$ $\qquad$ $1\,\mathrm{eV} = 1{,}602190 \times 10^{-19}\,\mathrm{J}$

$1\,\mathrm{cal} = 4{,}1855\,\mathrm{J}$ et $1\,\mathrm{Cal} = 1\,\mathrm{kcal} = 1\,000\,\mathrm{cal}$

Conversions

$E = h\nu$, $\lambda = c/\nu$, $\sigma = 1/\lambda$, $E = \mathsf{k}_\mathrm{B}T$

$1\,\mathrm{eV} \rightarrow 8\,065{,}48\ \mathrm{cm}^{-1} \rightarrow 2{,}417971 \times 10^{14}\ \mathrm{Hz} \rightarrow 1\,239{,}852\ \mathrm{nm} \rightarrow 11\,604{,}5\ \mathrm{K}$

$1\,\mathrm{eV} = 23\,045\ \mathrm{kcal/mol}$

Chapitre **1**

Physique quantique

La matière est composée d'atomes ou de molécules qui obéissent à des lois physiques souvent différentes de celles auxquelles nous sommes accoutumés dans le monde macroscopique. Cela ne veut pas dire que les lois fondamentales de la physique ne sont pas les mêmes pour les atomes et pour les objets macroscopiques. En effet, certains effets de ces lois physiques peuvent apparaître prépondérants à une échelle alors qu'ils ont peu d'importance à l'autre. On s'est ainsi aperçu, au début du vingtième siècle, que la mécanique classique, qui avait été développée pour décrire le mouvement d'objets macroscopiques, était incapable de décrire de manière satisfaisante certains phénomènes comme le rayonnement du corps noir, l'effet photoélectrique ou l'effet Compton. Il a fallu pour cela introduire une nouvelle théorie, la *mécanique quantique*, pour comprendre et expliquer le comportement d'objets microscopiques comme les atomes, les molécules ou les noyaux ainsi que leurs assemblages en entités plus complexes. La mécanique classique, qui permet de très bien décrire l'évolution des objets macroscopiques comme les planètes ou la chute des corps, en est une limite, lorsque certaines conditions sont satisfaites[1].

Un phénomène est qualifié de *quantique* s'il ne peut être expliqué que par la mécanique quantique. Il est qualifié de *classique* s'il peut être expliqué dans le cadre d'une théorie classique (mécanique, hydrodynamique, électromagnétisme, *etc.*). Bien que les phénomènes classiques puissent aussi être interprétés dans le cadre d'une théorie quantique, on ne les qualifie jamais, dans la pratique, de phénomènes quantiques. Nous nous conformerons à cet usage et appellerons *effet quantique* tout phénomène

1. Nous renvoyons le lecteur à nos ouvrages de *Physique quantique* et *Physique statistique*, édités chez Dunod, pour une introduction à ces sujets. Dans la suite, nous nous référerons à ces livres en utilisant les sigles MQ et PS, respectivement.

ne pouvant pas être interprété dans un cadre dit classique. Ainsi, selon les conditions, une particule pourra avoir un comportement classique ou quantique.

1.1 DUALITÉ ONDE-CORPUSCULE

La physique classique distingue les *particules*, qui correspondent à une densité d'énergie localisée dans l'espace, et les *ondes* qui correspondent à une délocalisation de l'énergie. Nous appellerons *corpuscules* les objets qui se comportent comme des particules classiques et utiliserons le terme de *particule* pour un objet qui peut être soit un corpuscule soit une onde.

Les corpuscules obéissent aux équations de la mécanique classique. Les ondes obéissent à des équations aux dérivées partielles avec des conditions aux limites qui dépendent du problème considéré. On obtient alors des solutions où toutes les énergies ne sont pas permises. Ainsi, le pincement d'une corde de guitare ne donne pas un spectre continu de fréquences.

L'évolution des corpuscules dans une théorie classique est *déterministe*. Si l'on connaît l'état d'un système à un temps t_0, ainsi que les caractéristiques des interactions, on peut, en principe, calculer l'état du système à un temps t ultérieur et définir la notion de *trajectoire*.

Les ondes se comportent parfois, lors de l'interaction avec la matière, comme des corpuscules. De même, des corpuscules se comportent, dans certaines conditions, comme des ondes. Ainsi, l'effet photoélectrique et l'effet Compton sont une manifestation de cet aspect corpusculaire de la lumière. D'autre part, le comportement ondulatoire des corpuscules est observé lors de la diffraction d'électrons, de neutrons, *etc.* sur des cristaux.

De nombreuses expériences montrent la nature ambivalente de la matière et du rayonnement. Les ondes électromagnétiques peuvent se comporter, lors de l'interaction avec la matière, comme des corpuscules (effet Compton), les corpuscules peuvent se comporter comme des ondes (diffraction des électrons). Cette dualité onde–corpuscule existe toujours au niveau microscopique. On peut observer l'un ou l'autre de ces deux aspects mais jamais les deux en même temps. La mécanique quantique résout cette apparente contradiction en disant qu'une particule n'est ni une onde ni un corpuscule mais qu'elle peut avoir l'un ou l'autre de ces comportements selon les conditions dans lesquelles elle se trouve.

Pour décrire un système classique, il suffit de connaître ses variables dynamiques : les positions et les vitesses de chaque particule le constituant. Si des charges électriques interviennent, il faut, en outre, connaître le champ électrique et le champ magnétique en tout point de l'espace. Les grandeurs physiques que l'on peut mesurer sont fonctions des quantités précédentes et le calcul différentiel et intégral est le cadre mathématique parfait pour élaborer les théories correspondantes.